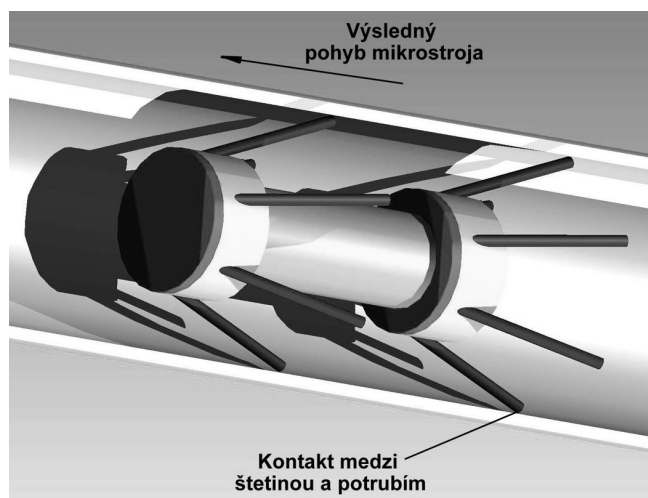


Trenie v potrubných mikrostrojoch (2)

Tatiana Maťašovská, Michal Kelemen

Trenie v mikrostrojoch

Riešený potrubný mikrostroj (obr. 4) [5] je založený na princípe diferencie trenia pri pohybe štetín dopredu a dozadu. Pohyb štetín dopredu a dozadu je generovaný oscilačným pohybom akčného člena, ktorý periodicky mení vzdialenosť medzi predným a zadným štetinovým blokom. Trecia sila medzi koncom štetiny a stenou potrubia pri jej pohybe dopredu je menšia, než pri pohybe dozadu. Čím väčší je tento rozdiel, tým je pohyb efektívnejší a rýchlejší. Ideálny prípad nastáva, ak trenie pri pohybe dozadu nadobúda hodnotu nekonečna. Vtedy dochádza k zablokovaniu štetiny a spätný pohyb je potlačený. Tento jav sa označuje ako „samouzamykací systém“ (angl. self-locking mechanism). Použité štetiny majú svoje fyzikálne obmedzenia (vyžaduje sa deformácia len v elastickej oblasti) a vnútorná stena potrubia vykazuje geometrické odchýlky rozmeru, tvaru a drsnosti povrchu. Z praktického hľadiska teda nie je možné dosiahnuť samouzamykanie štetín, ale je možné sa k nemu priblížiť [5].



Obr.4 Riešený potrubný mikrostroj

Pre opis trecích síl medzi koncom štetiny a stenou potrubia sa často uvádza vzťah

$$F_{t1,2} = \frac{F_N \cdot f}{1 \pm f \cdot \tan \alpha_1} \quad (1)$$

Zo vzťahu (1) je zrejmé, že trecia sila F_{t2} (v zmysle dozadu) je vždy väčšia ako trecia sila F_{t1} (v zmysle dopredu). Ak však hodnota koeficientu trenia f je rovná alebo väčšia než α_1 , potom trecia sila v zmysle dozadu F_{t2} konverguje do nekonečna, takže mikrostroj je automaticky zablokovaný „zamknutý“ pri spätnom pohybe nezávisle od normálovej sily – ide o spomínaný „samouzamykací systém“ [5].

Vzťah (1) neobsahuje informáciu o vplyve rýchlosti na treciu silu. Tento nedostatok rieši model (2)

$$F_t(v) = F_{to} + b \cdot v \quad (2)$$

kde $F_t(v)$ je trecia sila medzi štetinou a stenou potrubia,
 F_{to} – adhézna zložka trecej sily
 (uvažovaná ako súčin adhézneho koeficientu

trenia a normálovej prítláčnej sily),
 b – viskózný koeficient trenia,
 v – rýchlosť pohybu telesa.

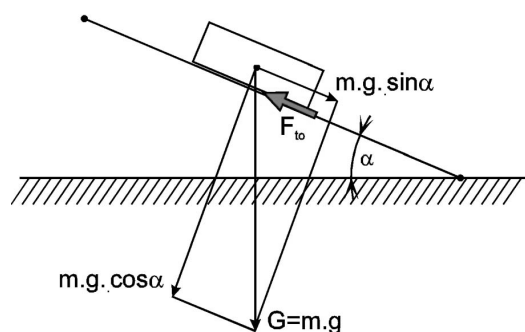
Experimentálne overenie modelu trenia

Jedným z najobjektívnejších spôsobov verifikácie modelu trenia je experiment. Podľa vzťahu (2) má model trenia adhéznú a viskóznú zložku. Na meranie adhézneho zložky je známy princíp sklonného tribometra (angl. declinable tribometer, obr. 5). Toto zariadenie je tvorené naklonenou rovinou, ktorej plocha pozostáva z rovnakého materiálu, aký má materiálová dvojica skúmaných materiálov. Teleso, ktoré sa po uvedenej rovine môže pohybovať, má svoju spodnú plochu tvorenú druhým materiálom zo skúmanej materiálovej dvojice.

Pre adhézný koeficient trenia môžeme potom uviesť známy vzťah:

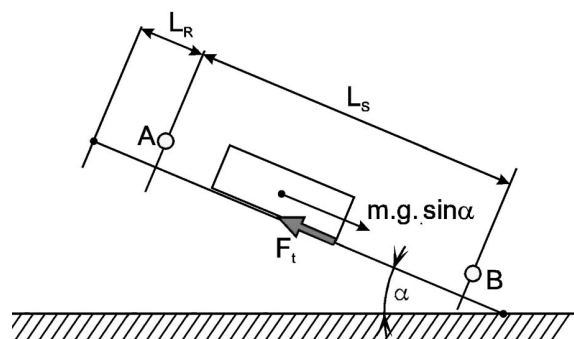
$$f_0 = \tan \alpha \quad (3)$$

Adhézný koeficient trenia je určený uhlom α , pri ktorom dôjde k porušeniu rovnováhy síl a teleso sa uvedie do pohybu. Prakticky je možné tento uhol určiť tak, že budeme plynulo zväčšovať uhol naklonenej roviny a v okamihu, keď sa teleso uvedie do pohybu, určíme uhol naklonenej roviny. Tento uhol závisí od adhézneho koeficientu trenia a podľa uvedeného vzťahu (3) nezávisí od hmotnosti pohybujúceho sa telesa. Na adhézný koeficient trenia vplyva aj viacero iných faktorov. Patrí k nim napr. drsnosť povrchu potrubia, tvar kontaktnej plochy štetiny, vlhkosť, teplota, prítomnosť nečistôt a iné [5].



m – hmotnosť telesa, g – tiažové zrýchlenie, α – uhol naklonenej roviny

Obr.5 Schéma merania adhézneho zložky trenia [5]



L_R – rozbehová dráha, L_S – šmyková dráha

Obr.6 Schéma merania viskózneho zložky trenia [5]





Na určenie viskózneho zložky trenia je možné použiť to isté zariadenie (obr. 6). V tomto prípade je však uhol nastavovaný na konkrétne zvolené hodnoty, pričom meranou veličinou je čas, za ktorý teleso prejde dráhu L_s . Je pochopiteľné, že teleso pri opakovaných meraniach sa nepodari uložiť na začiatok naklonenej roviny na to isté miesto. Preto je výhodné nechať teleso pohybovať sa najprv na nemeranom úseku L_R . Teleso sa na ňom pohybuje najprv zrýchľujúcim pohybom a po určitom čase (bod A – obr. 6). t. j. po uplynutí prechodového deja, dôjde k ustáleniu rýchlosti pohybu, takže teleso sa pohybuje konštantnou rýchlosťou (obr. 7). Aby teleso nevybočilo z dráhy a pohybovalo sa priamočiarym pohybom, je nutné použiť vedenie s minimálnymi pasívnymi odporami [5].

Pohybovú rovnicu telesa môžeme napísať v tvare:

$$m \cdot v + b \cdot v = G \cdot \sin \alpha - F_{to} \quad v = v(t) \quad (4)$$

kde m je hmotnosť pohybujúceho sa telesa,
 v – rýchlosť pohybujúceho sa telesa,
 $\dot{v}$ – zrýchlenie pohybujúceho sa telesa,
 b – viskózna konštanta,
 G – tiažová sila,
 α – uhol naklonenej roviny,
 F_{to} – adhézna zložka trecej sily.

Po transformácii do Laplaceovej oblasti:

$$m \cdot s \cdot v + b \cdot v = \frac{G \cdot \sin \alpha}{s} - \frac{F_{to}}{s} \quad v = v(s) \quad (5)$$

kde s je Laplaceov operátor.

Pre rýchlosť v Laplaceovej oblasti potom platí

$$v = \frac{G \cdot \sin \alpha - F_{to}}{b \cdot s \cdot \left(\frac{m}{b} \cdot s + 1 \right)} \quad v = v(s) \quad (6)$$

Po spätnej transformácii do časovej oblasti

$$v = \frac{G \cdot \sin \alpha - F_{to}}{b} \cdot \left(1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right) \quad v = v(t) \quad (7)$$

Člen

$$\left(1 - e^{-\frac{b}{m} t} \right)$$

charakterizuje prechodový dej (obr. 7), teda v ustálenom stave, t. j. pri predpoklade konštantnej rýchlosti pohybujúceho sa telesa sa vzťah pre rýchlosť telesa (7) zjednoduší:

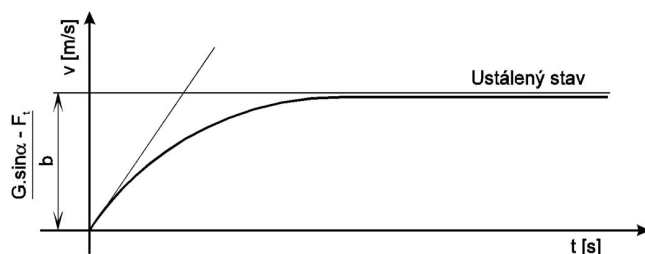
$$v = \frac{G \cdot \sin \alpha - F_{to}}{b} \quad v = v(t) \quad (8)$$

Pomocou vzťahu (8) je možné určiť viskóznou konštantu b , ak bude meraná rýchlosť pohybu telesa, adhézna zložka trecej sily a bude známy uhol naklonenej roviny

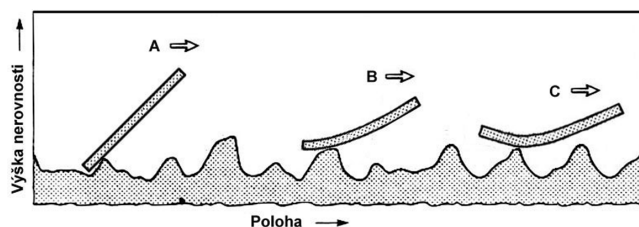
$$b = \frac{G \cdot \sin(\alpha) - F_{to}}{v} \quad v = v(t) \quad v = v(t) \quad (9)$$

Platnosť tejto rovnice (9) je však obmedzená len pre konštantnú rýchlosť pohybu telesa po naklonenej rovine, teda len času po uplynutí prechodového deja.

Podľa vzťahu (3) je adhézna zložka trenia nezávislá od hmotnosti pohybujúceho sa telesa. Z výsledkov meraní adhézneho zložky tre-



Obr.7 Závislosť rýchlosti pohybujúceho sa telesa po naklonenej rovine tribometra v čase [5]

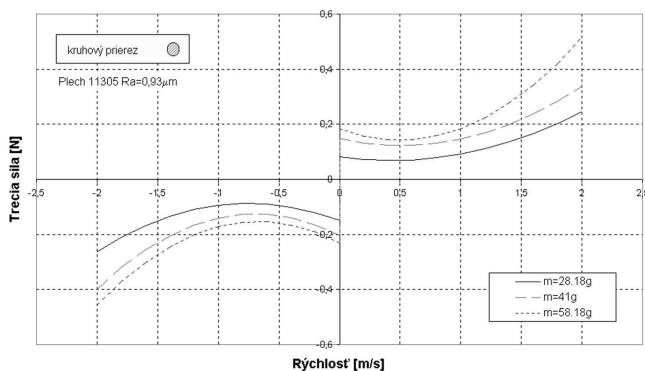


Obr. 8 Kontaktné javy medzi koncom štetiny a povrchom (nerovnosti sú zobrazené v hypertrofii vzhľadom na veľkosť štetiny pri popise situácie!) [5]

nia to však nie je potvrdené. Príčinou tejto skutočnosti je vplyv kontaktných javov pri interakcii konca štetiny a nerovnosti povrchu podložky (obr. 8), čo dokazujú výsledky namerané pri pohybe na skle [5].

V prípade (A), ak má príťažná sila malú hodnotu, koniec štetiny nekopíruje povrch nerovnosti. Prípade (C), ak má príťažná sila príliš veľkú hodnotu, koniec štetiny prestane interagovať s nerovnosťami povrchu. Zo zistených hodnôt adhézných koeficientov je to zjavné podľa toho, že rozdiel pri pohybe dopredu a dozadu vzhľadom k zošíkmeniu štetín poklesne.

Výsledok meraní je možné uviesť vo forme závislosti trecej sily od rýchlosti pohybu štetiny vzhľadom k stene potrubia. Na účely simulácií s matematickým modelom boli závislosti aproximované polynómom, a tieto zodpovedajú spomínanému Stribeckovmu modelu trenia (obr. 3).



Obr. 9 Závislosť trecej sily od rýchlosti pohybu modelu mikrostroja so štetinami kruhového prierezu s rôznymi príťažnými silami na stenu potrubia (sila uvedená prostredníctvom hmotnosti prídavného závažia aplikovaného na štetinu) [5]

Záver

Z obr. 9 vyplýva, že trecia sila pri pohybe štetiny dozadu je väčšia než pri pohybe dopredu. Vhodnou voľbou parametrov štetiny je možné tento rozdiel trecích síl výrazne ovplyvniť. Slabosťou tejto štruktúry je, že vždy bude dochádzať k spätnému pohybu štetiny, čo predstavuje z energetického hľadiska zbytočné straty [9], [10], [11]. Jednou z možností je optimalizovať parametre štetiny tak, aby sa dosiahol maximálny rozdiel trecích síl a aplikovať myšlienku tzv. „smart štetín“. Tieto sa adaptujú tak, že v prípade potreby sa trecia sila zväčší alebo zmenší. Vhodným algoritmom riadenia je teda možné ešte viac zefektívniť pohyb potrubného mikrostroja.

Podakovanie

Autori týmto ďakujú za čiastkovú podporu Slovenskej grantovej agentúry pre vedu (grant VEGA 1/0410/03 „Optimalizácia pohybu štetinového potrubného mikrostroja“) pri podpore tejto práce.

Literatúra

[1] BLÁŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M.: Tribológia. Bratislava, Alfa 1990.

- [2] BHUSHAN, B.: Handbook of Micro/Nano Tribology. New York, CRC Press 1999. ISBN 0849384028
- [3] PERSON, B., N., J.: Sliding Friction. Physical Principles and Applications. Berlin, Springer Verlag 1998. ISBN 3540671927
- [4] VOCEL, M. a kol.: Tření a opotřebení strojních součástí. Praha, SNTL 1976.
- [5] KELEMEN, M.: Mechatronické aspekty optimalizácie pohybu potrubného mikrostroja. Doktorandská dizertačná práca. Košice, apríl 2002.
- [6] ASTRÖM, K., J.: Control of Systems with Friction. In: The Fourth International Conference on Motion and Vibration Control. MOVIC '98, August 1998 Zurich.
- [7] HALLING, J.: Principles of Tribology. London, The MacMillan Press, Ltd. 1973
- [8] YAMAGUCHI, Y.: Tribology of Plastic Materials. Amsterdam, Elsevier 1990. ISBN 0444874453
- [9] DOVICA, M., GMITERKO, A.: To some Questions of Components and Modules of Mini and Micromechanisms. Mechanics '98. Proceedings of the International Scientific Conference. Volume I, Rzeszów University of Technology, Poland. June 1998, pp. 191 - 198.
- [10] SLIMÁK, I., DOVICA, M., GMITERKO, A.: K niektorým otázkam komponentov a modulov mini a mikromechanizmov. Acta Mechanica Slovaca 1997, č. 2, s. 65 – 77.
- [11] DOVICA, M., GMITERKO, A.: Mechanism for Moving in Thin Tube. Proceedings of 12th International Conference on Process Control and Simulation ASRTP' 96. Volume I. Košice, 10. - 13. september 1996, pp. 69 – 73.

Ing. Tatiana Maťašovská

Technická Univerzita v Košiciach
SjF, KPaBI

15

Ing. Michal Kelemen, PhD.

Technická Univerzita v Košiciach
SjF, KAMaM